МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 621.9:531.3 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-154-162

Влияние жесткости механической части привода и параметров резания на управление упругими деформациями формообразования



В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия, А. А. Закалюжный
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Одно из направлений повышения точности изготовления деталей резанием связано с управлением упругими деформациями инструмента и заготовки. Особенно это относится к деталям малой жесткости, закон изменения которой вдоль траектории движения инструмента является заданным. При этом управляющим параметром, как правило, выступает величина оборотной подачи, влияющая на силы резания, изменение которых вызывает вариации упругих деформаций. Для обеспечения заданной точности диаметра необходимо согласовать управляемую траекторию частоты вращения привода подачи с величиной подачи и априорно заданным законом изменения жесткости заготовки или законом изменения параметров процесса резания. Для этого необходимо определить закон преобразования частоты вращения двигателя в величину подачи и в конечном счете в упругие деформации. Этот закон зависит от жесткости механической части привода подачи и изменяющихся параметров процесса резания.

Материалы и методы. В статье приводится математическое моделирование и на его основе — анализ преобразования скорости подачи в силы резания с учетом конечного значения жесткости механической части привода и эволюционно изменяющихся параметров процесса резания.

Результаты исследования. Показано, что начиная с некоторого критического значения закон преобразования скорости подачи в силы резания становится принципиально зависящим от жесткости механической части привода. При этом наблюдается увеличение времени установления нового значения силы при варьировании скорости подачи, что влияет на точность обеспечения сил, согласованных с законом изменения жесткости детали. В статье приводятся алгоритмы вычисления упругих деформаций при заданном законе изменения жесткости, а также алгоритмы вычисления траектории скорости подачи, при которой деформации остаются постоянными. Показано, что на закон преобразования влияют и вариации параметров резания.

Обсуждение и заключение. Обсуждаются частотные и временные характеристики преобразования. Делается заключение о точности формируемого резанием диаметра в зависимости от жесткости механической части привода подачи и от некоторых параметров процесса резания.

Ключевые слова: силы резания, управление упругими деформациями, жесткость механической части привода подачи.

Для цитирования: Заковоротный, В. Л. Влияние жесткости механической части привода и параметров резания на управление упругими деформациями формообразования / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия, А. А. Закалюжный // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 154–162. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-154-162

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ: № 19-08-00022 и № 20-38-90074.



Influence of stiffness of the mechanical part of the drive and cutting parameters on the shaping elastic deformation control

V. L. Zakovorotny, V. E. Gvindjiliya, A. A. Zakalyuzhny
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. One of the ways to improve the accuracy of manufacturing parts by cutting is related to the control of elastic deformations of the tool and the workpiece. This is particularly true for slender parts, whose stiffness law along the tool path is given. In this case, the control parameter, as a rule, is the return flow rate, which affects the cutting forces, whose change causes variations in elastic deformations. To provide the specified accuracy of the diameter, it is required to coordinate the controlled trajectory of the feed drive speed with the feed rate and a priori given law of change in the stiffness of the workpiece or the law of variation of the cutting process parameters. To do this, it is required to determine the law of converting the engine speed into the feed rate, and, ultimately, into elastic deformations. This law depends on the stiffness of the mechanical part of the feed drive and the changing parameters of the cutting process.
Materials and Methods. The paper presents mathematical modeling and, on its basis, analysis of the conversion of the feed rate into cutting forces, taking into account the final stiffness value of the mechanical part of the drive and the evolutionary parameters of the cutting process.
Results. It is shown that, starting from a certain critical value, the law of converting the feed rate into cutting forces becomes fundamentally dependent on the stiffness of the mechanical part of the drive. At the same time, there is an increase in time for setting a new force value when the feed rate varies, which affects the accuracy of providing forces that are consistent with the stiffness law of the part. The paper presents algorithms for calculating elastic deformations for a given stiffness law, as well as algorithms for calculating the trajectory of the feed rate at which the deformations remain constant. It is shown that the law of conversion is also affected by variations in the cutting parameters.
Discussion and Conclusion. The frequency and time characteristics of the conversion are discussed. A conclusion is made about the accuracy of the diameter formed through cutting, depending on the stiffness of the mechanical part of the feed drive and on some parameters of the cutting process.

Keywords: cutting forces, control of elastic deformations, stiffness of the mechanical part of the feed drive.

For citation: V. L. Zakovorotny, V. E. Gvindjiliya, A. A. Zakalyuzhny. Influence of stiffness of the mechanical part of the drive and cutting parameters on the shaping elastic deformation control. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 154–162. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-154-162

Funding information: The research is done with the financial support from RFFI (grants nos. 19-08-00022 and 20-38-90074).

Введение. Синергетическая парадигма привела к пересмотру многих подходов к анализу свойств систем, взаимодействующих с различными средами [1–19]. Она используется при изучении процесса резания, как единой нелинейной динамической системы, в которой рассматриваются различные физические процессы, характеризующие состояние системы [10–18]. Системно-синергетический подход лежит в основе синергетической теории управления, а также управления процессами обработки на станках [18–24]. В таком случае обеспечивается согласование внешнего управления с внутренней динамикой резания [23–25]. Проблемы синергетического согласования актуальны при обработке маложестких деталей, у которых априорно задан закон ее изменения вдоль траекторий движения инструмента [13, 26–29]. Во всех указанных случаях необходимо осуществлять управление упругими деформационными смещениями вершины инструмента и заготовки в точке контакта с ней инструмента. Необходимо отметить, что погрешности геометрической топологии детали, формируемой резанием, на 60–80 % обусловлены упругими деформационными смещениями элементов системы резания [11, 13, 30]. Основные направления совершенствования систем управления процессами обработки на станках связаны с объединением собственно станка и ЭВМ [30–33]. Проблема же управления упругими деформационными смещениями инструмента и заготовки сформулирована еще в работах [34]. Наконец, синергетический подход к анализу и синтезу систем управления процессами обработки на станках, сформулированный в работах [23–25], поставил задачу построения систем управления процессами обработки на станках с ЧПУ на основе согласования программы исполнительных элементов станка с эволюционно изменяющимися свойствами процесса резания. Такой подход использован и при совершенствовании систем управления сверлением глубоких отверстий малого диаметра, а также при обеспечении устойчивости траекторий формообразующих движений [25, 35]. Таким образом, как при управлении процессами обработки на станках, так и при программировании траекторий формообразующих движений необходимо знать законы преобразования управляемых траекторий исполнительных элементов

станка в силы резания и, как следствие, при заданных упругих свойствах подсистем инструмента и заготовки в упругие их деформации. Они непосредственно влияют на параметры точности изготовления деталей. На законы преобразования влияет жесткость механической части приводов исполнительных элементов станка и параметры, характеризующие состояние процесса резания. Именно раскрытию влияния этих параметров на преобразование программируемых траекторий серводвигателей в силы резания посвящено исследование, приведенное в статье. Оно направлено на повышение эффективности управления точностью изготовления деталей.

Материалы и методы. Рассмотрим продольное точение вала постоянного диаметра, в котором задан закон изменения его жесткости в направлении, нормальном к оси вращения (рис. 1). При описании преобразования траекторий серводвигателей в силы, действующие на инструмент, примем следующие гипотезы:

1. Рассмотрим случай, при котором заданная вдоль оси вращения жесткость $c(L)$ заготовки на порядок меньше жесткости подсистемы инструмента (рис. 1). Поэтому деформациями инструмента относительно несущей системы станка можно пренебречь.

2. Будем считать заданными и управляемыми в пределах полос пропускания серводвигателей траектории вращения шпинделя и привода суппорта. Инерционность механической части привода подачи отнесем к ротору двигателя подачи. Она влияет на переходные процессы в серводвигателе.

3. Реакцией на скорости серводвигателей со стороны процесса резания пренебрегаем. Это справедливо, если мощность резания, приведенная к роторам двигателей, существенно меньше мощности серводвигателей.

4. Будем рассматривать, кроме упругости заготовки, упругость всей механической части привода подачи, которую учтем обобщенной жесткостью c_0. Так как в процессе обработки реверсирование привода подачи отсутствует, то жесткость c_0 можно считать постоянной на всей траектории движения суппорта.

5. Для формирования сил при постоянной скорости резания примем гипотезу об их зависимости от площади срезаемого слоя. Запаздыванием сил по отношению к изменению площади среза пренебрегаем [23–24].

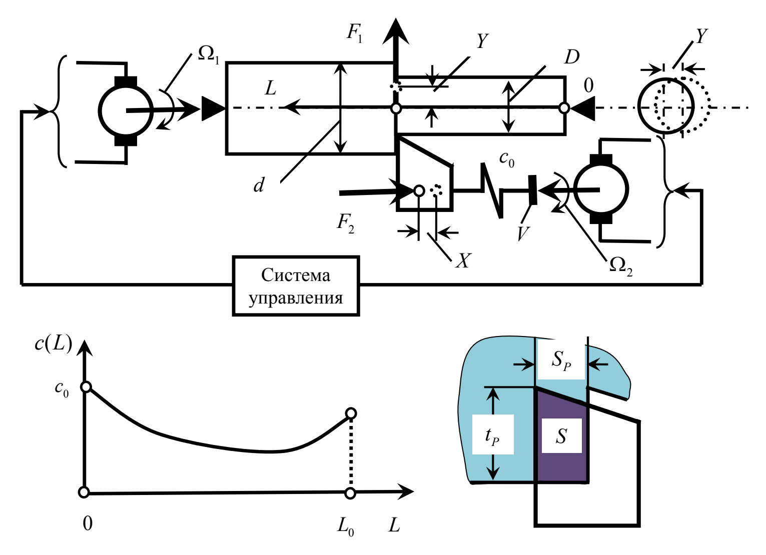


Рис. 1. Схема динамической системы преобразования траекторий исполнительных элементов станка в силы резания

Тогда модуль силы резания пропорционален площади срезаемого слоя

$$\mathrm{F(t)} = F_0\{\chi_1, \chi_2\}^T, \quad (1)$$

где $F_0 = \rho S$ — модуль силы резания в $[кг]$;

ρ — давление стружки на переднюю поверхность инструмента в $[кг/мм^2]$;

S — площадь срезаемого слоя в $[мм^2]$;

χ_1, χ_2 — безразмерные коэффициенты. Связь скорости подачи V и упругих деформационных смещений X и Y определяется из системы (рис. 1).

$$\begin{cases} c_0 X = \chi_2 \rho (t_P - Y) \int\limits_{t-T}^{t} [V(\xi) - v(\xi)] d\xi; \\ c(L) Y = \chi_1 \rho (t_P - Y) \int\limits_{t-T}^{t} [V(\xi) - v(\xi)] d\xi, \end{cases} \quad (2)$$

где $v(t) = dX / dt$; $V(t) = k\Omega_2(t)$;

k — коэффициент, определяющий связь частоты вращения привода подачи и скорости суппорта в $[мм]$.

Частоты Ω_1 и Ω_2 рассматриваются в $[c^{-1}]$. Поэтому время T в интегральном операторе формирования подачи $T = (\Omega_1)^{-1} = const$.

Изучение преобразования скорости подачи V в силы резания удобно выполнить в частотной области. Для этого можно воспользоваться преобразованиями Лапласа и Фурье [36]. Однако система (2) имеет не только запаздывающие аргументы, но и мультипликативные члены. Использование же методов преобразования Лапласа и Фурье возможно лишь для линейных систем. Поэтому исследование выполним в два этапа. На первом этапе в (2) положим $Y \to 0$ по сравнению с глубиной резания t_P. Тогда проанализируем преобразование скорости подачи в силы на основе выражения

$$c_0 X = \chi_2 \rho t_P \int\limits_{t-T}^{t} [V(\xi) - v(\xi)] d\xi. \quad (3)$$

Нетрудно показать, что передаточная функция $W(p) = F(p) / V(p)$ равна

$$W(p) = c_\Sigma \frac{1 - \exp(-Tp)}{p} \frac{1}{1 + \frac{c_\Sigma}{c_0}[1 - \exp(-Tp)]} \quad (4)$$

где $c_\Sigma = \rho t_P \chi_2$ имеет смысл жесткости процесса резания. Выражение (4) позволяет выяснить частотные свойства преобразования скорости подачи V в силу резания F в зависимости от безразмерного параметра $A = c_\Sigma / c_0$. Этот параметр определяет отношение жесткости процесса резания к жесткости механической части привода подачи. При $A \to 0$ передаточная функция $W(p) \Rightarrow c_\Sigma \frac{1 - \exp(-Tp)}{p}$. При $A \to \infty$ $W(p) \Rightarrow \frac{c_\Sigma}{p}$. Это два крайних случая. Если случай $A \to 0$ возможен при существенном увеличении жесткости механической части привода по сравнению с жесткостью процесса резания, то второй случай требует уменьшения жесткости привода до нуля, что для реальных систем невозможно. Приведем примеры $W(j\omega)$ для различных A (рис. 2). Амплитуда рассмотрена в относительных единицах к $c_\Sigma = 1$.

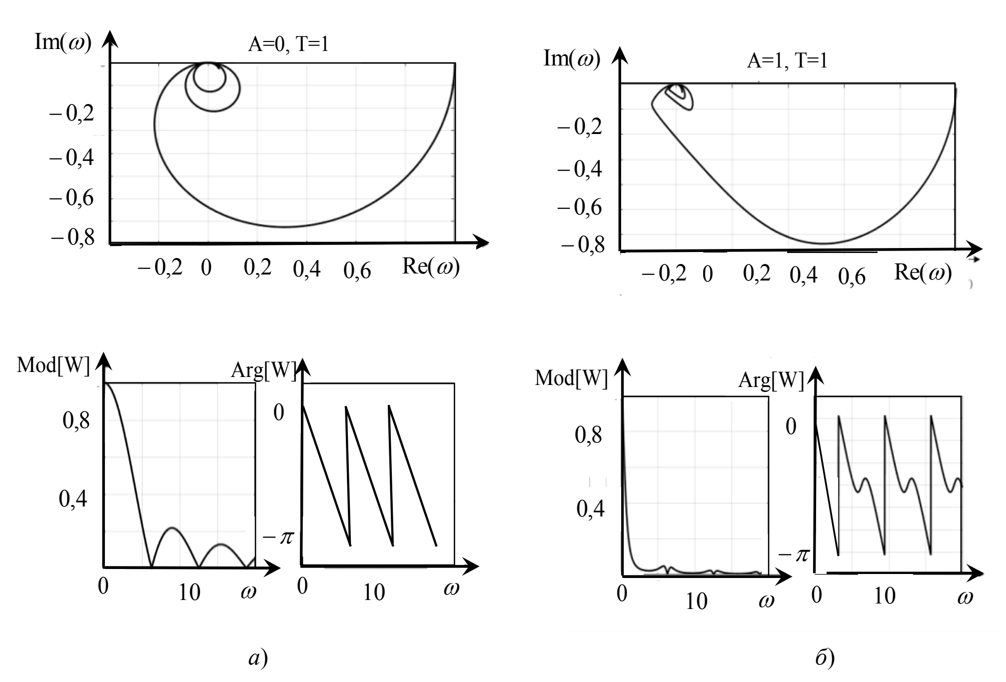


Рис. 2. Пример частотных характеристик преобразования скорости подачи в модуль силы резания: а–A=0, б–A=1

Вначале рассмотрим случай, когда деформации механической части между ротором двигателя подачи и перемещением суппорта отсутствуют (рис. 2 *а*). Такая частотная характеристика обусловлена свойством интегрального оператора $\int_{t-T}^{t} V(\xi)d\xi$ формирования величины подачи, который раскрывает тот факт, что величина подачи есть путь, пройденный инструментом относительно заготовки в течение периода ее вращения. Естественно, что составляющие изменения скорости подачи, частота которых равна или кратна частоте вращения заготовки, после интегрирования обращаются в ноль. Это частоты, на которых $Mod[W(j\omega)] = 0$ (рис. 2). При этом наблюдается быстрое вращение фазы на частотах, близких к частоте вращения заготовки, что способствует самовозбуждению систем управления процессом резания. Увеличению податливости механической части привода соответствует изменение частотных свойств преобразования скорости V в силы резания. Во-первых, полоса пропускания этого преобразования заметно уменьшается, что должно способствовать увеличению времени переходного процесса при установлении нового значения управляемых сил резания. Во-вторых, периодические вариации фазы наблюдаются в области большего затухания амплитуды. Наконец, при еще больших увеличениях податливости характеристики преобразования скорости в силы приближаются к интегрирующему звену. В основе механизма затягивания переходного процесса лежит перераспределение сил, влияющих на деформационные смещения, и деформационных смещений, влияющих, в свою очередь, на силы. Этот функционально связанный процесс зависит от жесткости механической части привода подачи.

Приведенный анализ позволяет также оценить влияние на динамику преобразования скорости V в силы резания деформационных смещений заготовки в направлении оси ее вращения (направление Y на рис. 1). Очевидно, что при уменьшении жесткости c уменьшается и параметр A, влияющий на динамику преобразования скорости подачи в силы резания.

Алгоритм вычисления траектории скорости подачи. Для обеспечения заданных значений диаметра путем управления деформацией Y необходимо подобрать такие траектории скорости V, при которых $Y = const$. Для этого вместо интегрального оператора в (2) рассмотрим его первообразные, то есть

$$\begin{cases} c_0 X = \chi_2 \rho(t_P - Y)[L(t) - L(t-T) - X(t) + X(t-T)]; \\ c(L)Y = \chi_1 \rho(t_P - Y)[L(t) - L(t-T) - X(t) + X(t-T)], \end{cases} \qquad (5)$$

где $L(t)$ — траектория перемещения суппорта без учета упругих деформаций, то есть $L(t) = \int_0^t V(\xi)d\xi$. В (5) $L(t) - L(t-T) = S_P^{(0)}(t)$ — текущее значение подачи без учета деформационных смещений. Если $c(L) = const$ и рассматривается установившееся состояние ($X(t) = X(t-T)$), то $S_P^{(0)} = S_P = VT$. Здесь $S_P(t) = S_P^{(0)} - [X(t) - X(t-T)]$. Подчеркнем, что величина подачи $S_P^{(0)}$, оцениваемая традиционно, отличается от действительного ее значения $S_P(t)$.

Будем вычислять деформационные смещения в (5) последовательно после каждого оборота заготовки и определим последовательности $\mathrm{X(iT)} = \{X(0), X(T), ...X(nT)\}$, $\mathrm{Y(iT)} = \{Y(0), Y(T), ...Y(nT)\}$, $\mathrm{S_P(t)} = \{S_P(T), ..S_P(nT)\}$, $\mathrm{c(T)} = \{c[S_P(T)], ...c[(\sum_{i=1}^{i=n} S_P(iT)]\}$. Таким образом, за n оборотов заготовки суппорт проходит расстояние $L(n) = \sum_{i=1}^{i=n} S_P(iT)$. В этих последовательностях $X(0) = Y(0) = 0$. Можно рассмотреть решение двух задач.

Первая задача анализа, то есть определения траекторий деформационных смещений X(iT) и Y(iT) при постоянной скорости подачи. Для вычисления значений $X(T), Y(T)$ и последующих величин деформационных смещений $X(iT), Y(iT)$ можно воспользоваться соотношениями, в которых известны все предыдущие значения $X[(i-1)T)], Y[(i-1)T)]$, а также $c[(\sum_{l=1}^{l=i-1} S_P(lT)]$. Здесь $V = const$, следовательно, $c[(\sum_{l=1}^{l=i-1} S_P(lT)] = (c(iS_P)$. Таким образом, для вычисления $X(iT), Y(iT)$ можно воспользоваться системой

$$\mathrm{c_\Sigma Z^{(i)} = F^{(i)}}, \qquad (6)$$

где $\mathrm{Z^{(i)}} = \{Y(iT), X(iT)\}^T$; $\mathrm{F^{(i)}} = \rho S_P^{(0)}[t_P + X((i-1)T)]\{\chi_2, \chi_1\}^T$;

$$c_\Sigma = \begin{bmatrix} c_0 + \chi_2 \rho t_P & \chi_2 \rho S_P^{(0)} \\ \chi_1 \rho t_P & [(c(iS_P) + \chi_1 \rho S_P^{(0)} \end{bmatrix}.$$

В (5) отброшены мультипликативные члены от деформационных смещений, которые являются малыми величинами. При заданной скорости $V = const$ нас интересует прежде всего закон изменения деформационных смещений $\mathrm{Y(iT)} = \{Y(0), Y(T), ... Y(nT)\}$, который характеризует погрешность диаметра. На основе (6) для деформационных смещений $Y(iT)$, непосредственно влияющих на диаметр детали, получаем

$$Y(iT) = \frac{\chi_2 \rho c(iS_P) S_P^{(0)} \{t_P + X[(i-1)T)]\}}{c_0 c(iS_P) + \chi_1 \rho c_0 S_P + \chi_2 \rho c(iS_P) t_P}. \quad (7)$$

Таким образом, $Y(iT)$ зависят не только от закона распределения жесткости заготовки $c(L)$ по пути резания L, но и от $\partial c(L) / \partial L$, влияющего на $Y(t-T)$. На силы резания, следовательно, диаметр D, влияет давление стружки ρ. Оно меняется, например, по мере нарастания износа инструмента, изменения его геометрии, условий обработки и свойств обрабатываемого материала.

Вторая задача синтеза, то есть определения последовательности $\mathrm{S_P(t)} = \{S_P(T), ... S_P(nT)\}$ и соответствующей ей скорости $V(t)$ таким образом, чтобы выполнялось условие $Y(iT) = const, \quad Y(iT) \in \mathrm{Y(iT)}$. Это условие постоянства диаметра при заданном законе $c(L)$ при прочих неизменных условиях. Заметим, что постоянные составляющие в деформационных смещениях $\mathrm{Y(iT)}$ не имеют принципиального значения, так как могут учитываться с помощью статической установки инструмента [34]. Для определения закона изменения величины подачи на каждом обороте заготовки по критерию обеспечения постоянства диаметра необходимо в (7) положить $Y(iT) = const$. Тогда необходимо вычислить последовательность $\mathrm{S_P(t)} = \{S_P(T), ... S_P(nT)\}$. Процедура вычисления на i-ом обороте заготовки заключается в определении $S_P(iT)$ при условии, что заданы $\mathrm{X(iT)} = \{X(0), X(T), ... X[(i-1)T]\}$, $\mathrm{Y(iT)} = \{Y^*(0), Y^*(T), ... Y^*[(i-1)T]\}$, следовательно, определены все величины подач $\mathrm{S_P(t)} = \{[S_P(T) = Y(T) - Y(0)], ... S_P[(i-n)T = [Y((i-1)T) - Y((i-2)T)]\}$. Из (7) получаем

$$S_P(iT) = \frac{Y^* c[(\sum_{l=1}^{l=i-1} S_P(lT)]\{c_0 + \chi_2 \rho t_P\}}{\chi_1 \rho c_0 \{t_P + X[(i-1)T] - Y^*\}}, \quad (8)$$

где $Y^* = const$ — заданная величина упругих деформационных смещений.

В (8) значение жесткости заготовки берется средним в течение каждой подачи. Тогда на основе вычисленных $\mathrm{S_P(t)} = \{S_P(T), ... S_P(nT)\}$ определяются закон изменения $V(t)$ и, следовательно, программируемая траектория скорости подачи во времени или пути. Вычисление траектории $V(t)$ осуществляется на основе решения обратных задач динамики [37–38].

Результаты исследования. Для обеспечения точности изготовления маложестких валов необходимо согласовать траектории исполнительных элементов станка с изменяющейся жесткостью заготовки вдоль траектории движения инструмента. Согласование необходимо выполнить и в том случае, если учитываются эволюционные изменения свойств процесса резания, обусловленные, например, изнашиванием инструмента или термодинамическими процессами, а также регулярными возмущениями, к примеру, вариациями припуска. Для этого прежде всего требуются знания законов преобразования программируемой скорости подачи суппорта в силы резания и далее в сами деформации, изменяющие текущее значение диаметра заготовки. Выполненные исследования показали, что закон преобразования зависит от параметров жесткости взаимодействующих подсистем и параметров динамической связи, формируемой процессом резания.

Среди параметров жесткости принципиальное значение имеют характеристики жесткости механической части приводов подачи, которые можно оценить суммарной приведенной жесткостью c_0. Она изменяет амплитудно-фазовую частотную характеристику преобразования скорости подачи в силы резания (рис. 2). Как видно, уменьшение жесткости привода существенно уменьшает амплитуду по мере роста частоты и изначальная АФЧХ, которая имела заметные всплески, преобразуется в характеристику с амплитудным затуханием. Такая характеристика вызывает преобразования колебательных переходных процессов в монотонные, близкие к апериодическим. По мере уменьшения c_0 наблюдается уменьшение частоты среза в преобразовании скорости подачи в силы резания (рис. 2), следовательно, возрастает время переходного процесса, например, изменения силы резания при врезании инструмента. Пример изменения переходных процессов установления силы F_0 при точении вала из стали 20Х диаметром 80 мм приведен на

рис. 3. Точение на режимах: скорость резания 4,0 м/с (частота вращения шпинделя — 1000 об/мин), глубина резания t_P — 2,0 мм, величина подачи S_P — 0,1 мм. Для этого случая $\rho = 400\ кг/мм^2$.

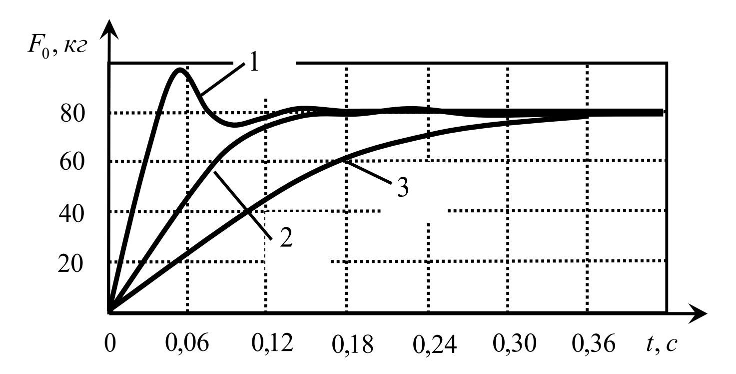


Рис. 3. Пример изменения переходных процессов установления силы:

F_0: *1 — c_0 = 1000 кг/мм, 2 — c_0 = 750 кг/мм, 3 — c_0 = 500 кг/мм*

Из отмеченных выше свойств интегрального оператора формирования величины подачи следует важное заключение о возможности управления силами резания, следовательно, упругими деформационными смещениями инструмента относительно заготовки. При изменении скорости подачи частотные составляющие возмущений, равные или кратные частоте вращения заготовки, становятся неуправляемыми с помощью вариации скорости привода подачи. Например, это вариации припуска, обусловленные несоосностью установки заготовки, радиальные биения шпинделя и пр. Приведенные данные также показывают, что переходные процессы преобразования скорости подачи в силы зависят также от параметров динамической связи, формируемой процессом резания, и прежде всего от параметра давления стружки на переднюю поверхность инструмента. Этот параметр изменяется по мере развития износа инструмента. На динамику преобразования траекторий исполнительных элементов станка в силы резания оказывают влияние все факторы, связывающие силы резания с площадью срезаемого слоя. Эти факторы ограничивают возможности управления точностью изготовления деталей путем варьирования траекторий исполнительных элементов станка. Это относится прежде всего к обработке деталей сложной геометрической формы.

Обсуждение и заключения. Одно из направлений повышения точности изготовления деталей на станках связано с согласованием программы ЧПУ с изменяющимися динамическими свойствами процесса резания. Причем эти изменения могут быть заданы априорно. Например, априорно может быть задан закон изменения матриц жесткости вдоль траектории исполнительных элементов станка. Они могут развиваться по некоторому случайному закону, например, в связи с развитием износа инструмента. Во многих случаях управление точностью осуществляется на основе изменения упругих деформационных смещений инструмента и заготовки. Как показано в статье, закон преобразования скорости подачи в силы резания и упругие деформационные смещения, во-первых, зависит от параметров упругости механической части приводов подачи, влияя не только на время переходных процессов, но и на их форму. Во-вторых, закономерности преобразования скорости подачи в силы зависят от эволюции параметров взаимодействующих подсистем со стороны инструмента и заготовки, а также параметров формируемой резанием динамической связи. Раскрытые закономерности преобразования позволяют не только выяснить ограничения, накладываемые системой резания на возможности управления точностью, но и повысить их точность.

Библиографический список

1. Haken, H. Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems / H. Haken. — Amsterdam: Elsevier, 2006. — 251 p.

2. Prigogine, I. The second law as a selection principle: The microscopic theory of dissipative processes in quantum systems / I. Prigogine, C. George // Proceedings of the National Academy of Sciences. — 1983. — Vol. 80 (14). — P. 4590−4594. https://doi.org/10.1073/pnas.80.14.4590

3. Эбелинг, В. Физика процессов эволюции. Синергетический подход / В. Эбелинг, А. Энгель, Р. Файстель ; [перевод с немецкого Ю. А. Данилова]. — Москва : Эдиториал УРСС, 2001. — 328 с.

4. Моисеев, Н. Н. Расставание с простотой (Путь к очевидности) / Н. Н. Моисеев. — Москва : Аграф, 1998. — 472 с. ISBN 5-7784-0050-0.

5. Николис, Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление / Дж. Николис, Ю. А. Данилов. — Москва : Мир, 1989. — 488 с.

6. Заковоротный, В. Л. Модель управления современным предприятием на основе системносинергетического подхода / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек, Е. А. Угнич // Экономическая наука современной России. — 2016. — № 4 (75). — С. 112–128.

7. Колесников, А. А. Прикладная синергетика: основы системного синтеза / А. А. Колесников. — Таганрог : ТТУ ЮФУ, 2007. — 384 с.

8. Заковоротный, В. Л. Динамика транспортных трибосистем / В. Л. Заковоротный, В. В. Шаповалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2005. — № 12. — С. 19–24.

9. Рыжкин, А. А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Донской гос. техн. ун-т, 2019. — 289 с.

10. Оптимизация режима резания при лезвийной обработке / А. А. Рыжкин, Д. В. Моисеев, А. И. Боков [и др.]. — Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2017. — 34 с.

11. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. — Москва : Машиностроение, 2009. — 640 с.

12. Мигранов, М. Ш. Исследования изнашивания инструментальных материалов и покрытий с позиций термодинамики и самоорганизации / М. Ш. Мигранов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2006. — № 11. — С. 65–71.

13. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. — Москва : Машиностроение, 2005. — 736 с.

14. Мелентьев, Г. А. Резание материалов ; учебник / Г. А. Мелентьев, А. Г. Схиртладзе, В. П. Борискин. — Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2019. — 512 с.

15. Кузнецов, В. А. Системный анализ и моделирование технологических методов изготовления деталей / В. А. Кузнецов, А. А. Черепахин, А. В. Смирнов. — Москва : КноРус, 2019. — 248 с.

16. Лапшин, В. П. Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов / В. П. Лапшин, В. В. Христофорова, С. В. Носачев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). — 2020. — Т. 22, № 3. — С. 44–58. http://dx.doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58

17. Моделирование влияния температуры в зоне контакта инструмента и детали на динамику деформационных движений инструмента при точении металлов / В. П. Лапшин, И. А. Туркин, В. В. Христофорова, Т. С. Бабенко // СТИН. — 2019. — № 10. — С. 31–37.

18. Лапшин, В. П. Пример экспериментальной оценки износа на составляющие силы резания при точении металлов / В. П. Лапшин, И. А. Туркин, В. В. Христофорова // СТИН. — 2020. — № 4. — С. 41–44.

19. Колесников, А. А. Синергетическая теория управления (инварианты, оптимизация, синтез) / А. А. Колесников. — Таганрог : Таганрогский государственный радиотехнический университет Москва : Энергоатомиздат, 1994. — 343 с.

20. Колесников, А. А. Синергетическая теория управления / А. А. Колесников. — Москва : Энергоатомиздат, 1994. — 344 с.

21. Колесников, А. А. Метод АКАР и теория адаптивного управления в задачах синтеза нелинейных систем управления / А. А. Колесников, Ал. А. Колесников, А. А. Кузьменко // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2017. — Т. 18, № 9. — С. 579–589. https://doi.org/10.17587/mau.18.579-589

22. Колесников, А. А. Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления / А. А. Колесников, Ал. А. Колесников, А. А. Кузьменко // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2016. — Т. 17, № 10. — С. 657–669. https://doi.org/10.17587/mau.17.657-669

23. Заковоротный, В. Л. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек, Фам Динь Тунг // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, № 10 (61). — С. 1785–1797.

24. Заковоротный, В. Л. Синергетический подход к управлению процессом обработки на станках токарной группы / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Наукоемкие технологии в машиностроении. — 2019. — № 11 (101). — С. 29–38. https://10.30987/article_5d9dc9b8e6bdd8.19855459

25. Заковоротный, В. Л. Свойства формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий малого диаметра / В. Л. Заковоротный, Е. Ю. Панов, П. Н. Потапенко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2001. — Т. 1, № 2. — С. 81–93.

26. Азаров, А. С. Высокопроизводительная обработка валов в машиностроении / А. С. Азаров. — Ленинград : Машгиз, 1951. — 224 с.

27. Бобровский, А. В. Технология механической обработки маложестких осесимметричных деталей / А. В. Бобровский, О. И. Драчев // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2019. — № 9 (232). — С. 15–17.

28. Драчев, О. И. Система автоматического управления эксплуатационной точностью длинномерных валов / О. И. Драчев // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2017. — № 5 (200). — С. 18–20.

29. Жолобов, А. А. Прогнозирование и обеспечение точности токарной обработки ступенчатых валов / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2014. — № 1 (42). — С. 6–14.

30. Плотников, А. Л. Управление системами и процессами / А. Л. Плотников. — Волгоград : ВолгГТУ, 2010. — 167 с.

31. Михеев, Ю. Е. Системы автоматического управления станками / Ю. Е. Михеев, В. Л. Сосонкин. — Москва : Машиностроение, 1978. — 264 с.

32. Легаев, В. П. Повышение эффективности токарной обработки на основе автоматического контроля показателей процесса резания / В. П. Легаев, Л. К. Генералов // Вестник машиностроения. — 2011. — № 1. — С. 44–46. https://doi.org/10.3103/S1068798X1101014X

33. Максимов, С. П. Современное состояние и перспективы развития систем ЧПУ / С. П. Максимов, В. Э. Колосов, К. Н. Морозов // Инновации в науке. — 2014. — № 40. — С. 40–45.

34. Адаптивное управление станками / Б. М. Базров [и др.]. — Москва: Машиностроение, 1973. — 688 с.

35. Заковоротный, В. Л. Влияние флуктуаций на устойчивость формообразующих траекторий при точении / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2017. — № 2 (194). — С. 52–61. https://doi.org/10.17213/0321-2653-2017-2-52-61

36. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. — Москва : Наука, 1968. — 720 с.

37. Крутько, П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П. Д. Крутько. — Москва : Наука, 1987. — 304 с.

38. Галиуллин, А. С. Методы решения обратных задач динамики / А. С. Галиуллин. — Москва : Наука, 1986. — 224 с.

Поступила в редакцию 28.04.2021
Поступила после рецензирования 02.06.2021
Принята к публикации 04.06.2021

Об авторах:

Заковоротный Вилор Лаврентьевич, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID I-2990-2014, Scopus ID 7005349023, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2187-9897, vzakovorotny@dstu.edu.ru

Гвинджилия Валерия Енвериевна, аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Researcher ID: AAM-4580-2020, Scopus Author ID: 57204638971, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1066-4604, sinedden@yandex.ru

Закалюжный Алексей Александрович, аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1888-3222, zakalizhnuy-95@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. Л. Заковоротный — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, анализ результатов исследований; В. Е. Гвинджилия — моделирование процесса резания, подготовка текста, формирование выводов, А. А. Закалюжный — проведение расчетов, моделирование частотных и переходных характеристик.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.